

# 薄板の熱応力割断における空気吹き付けによる冷却効果

本 村 文 孝\*・今 井 康 文\*  
才 本 明 秀\*

## Effect of Cooling by Airblow on the Thermal Stress Cleaving of a Thin Plate

by

Fumitaka MOTOMURA\*, Yasufumi IMAI\*

Akihide SAIMOTO\*

The thermal stress field induced by a line heat source like an electric resistance wire causes crack extension. Taking advantage of this phenomenon, some glassy materials can be cleaved without any microcracks on the cleaving surface. On the cleaving process of glass plates, airblow has been confirmed to be effective. In this paper, an optimum heating position and an effective airblow timing are investigated to increase the thermal stress intensity factors.

### 1. 緒言

電気ヒーター等に使用されているニクロム線のような熱線をぜい性材料に接触させると、き裂が加熱線に沿って進展し薄板を割断できることがある。これは不均一な温度変化によって材料内に生じた熱応力によるものである。この現象を利用すると、長方形のガラス板を等分する割断では高い直進精度が期待でき、創成された破面にはマイクロクラックや残留応力を発生しないので、外荷重が掛っても端面から破断しにくくなる。また、温度上昇を極力抑えた迅速な割断は必要不可欠である。そこで、線加熱と局所冷却を併用した加工法に注目してみた。

本文では、解析的に局所冷却の影響を確認するため、点熱源が作用する矩形板の二次元熱弾性問題を利用した。また線形破壊力学にもとづき、熱応力拡大係数を上昇させる最適な吹き付け位置および吹き付け開始時間の検討を数値解析により行なった。

### 2. 線熱源および点熱源による非定常熱弾性場

始めに、Fig. 1 のように中心線上に線加熱を受け、き裂線上を中心に吹き付けを受ける薄板を考える。薄板片面からの自然放熱を考慮した線熱源によって生じ

る非定常温度場は次のようになる。

$$T(y,t) = \frac{WQ_1}{\lambda} [F_0(t) + F_1(y,t)] \quad (1)$$

$$F_0(y,t) = \frac{1}{2} \frac{B}{h_0 W^2} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{h_0 W^2}{B} \frac{\kappa t}{W^2} \right) \right] \quad (2)$$

$$F_1(y,t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{h_0} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{\kappa t}{W^2} h_0' \right\} \right] \cos \left( \frac{m\pi y}{W} \right) \quad (3)$$

$$h_0' = m^2 \pi^2 + \frac{h_0 W^2}{B} \quad (4)$$

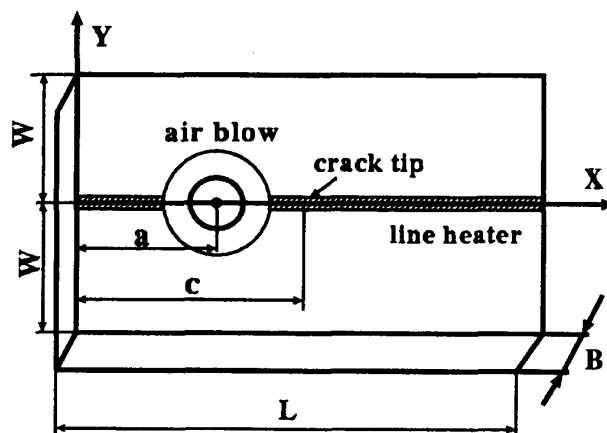


Fig. 1 Analytical Model

平成10年10月28日受理

\*機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

ここで、 $F_0$  は均一温度上昇の項であり、 $F_1$  は位置に依存する項である。また、 $Q_1$  は単位厚さ、単位長さ、単位時間当りの熱量であり、 $\lambda$ ,  $\kappa$ ,  $(h_0 \cdot \lambda)$ , は熱伝導率、熱拡散率、自然対流熱伝達係数である。

空気吹き付けの効果は分布した負の熱源によって評価した。その大きさは、線熱源によって生じた温度上

昇と強制対流熱伝達係数の積によって表すことができる。分布熱源を点熱源の集合と見做し、き裂線に上下対称に位置する2つの点熱源によって生じる矩形板の特異熱応力場はFig 2 のような周期熱源の重ね合わせによって評価した。

次式はそのときの非定常応力場である。

$$\sigma_x(x,y,t) = \frac{\alpha E W Q_1}{\lambda} \left[ \frac{h(r) d A}{8 \pi B} \{F_0(y,t) + F_1(y,t)\} \right] [F_2(x,y,t) - F_3(x,y,t)] \quad (5)$$

$$\sigma_y(x,y,t) = \frac{\alpha E W Q_1}{\lambda} \left[ \frac{h(r) d A}{8 \pi B} \{F_0(y,t) + F_1(y,t)\} \right] [F_2(x,y,t) + F_3(x,y,t)] \quad (6)$$

$$\tau_{xy}(x,y,t) = \frac{\alpha E W Q_1}{\lambda} \left[ \frac{h(r) d A}{8 \pi B} \{F_0(y,t) + F_1(y,t)\} \right] [F_4(x,y,t)] \quad (7)$$

$$F_2(x,y,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_1 \left( -\frac{r_{j,m,n}^2}{4 \frac{\kappa t}{W^2}} \right) \quad (8)$$

$$F_3(x,y,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{r_{j,m,n}^2}{4 \frac{\kappa t}{W^2}} \right) \right] \left( 1 - 2 \frac{X_m^2}{r_{j,m,n}^2} \right) \frac{4 \frac{\kappa t}{W^2}}{r_{j,m,n}^2} \quad (9)$$

$$F_4(x,y,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{8 \frac{\kappa t}{W^2} X_m Y_{j,n}}{r_{j,m,n}^2} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{r_{j,m,n}^2}{4 \frac{\kappa t}{W^2}} \right) \right] \quad (10)$$

$$X_m = \frac{(x-2mL+X)}{W}, \quad Y_{j,n} = \frac{(y-2nW+(-1)^j Y)}{W}, \quad r_{j,m,n}^2 = X_m^2 + Y_{j,n}^2$$

ここで、 $h(r)$ ,  $E$ ,  $\alpha$  は強制対流熱伝達係数、縦弾性係数、線膨張係数である。

験は4種類の流量について、ガラスからノズル先端までの距離を変えて行なった。

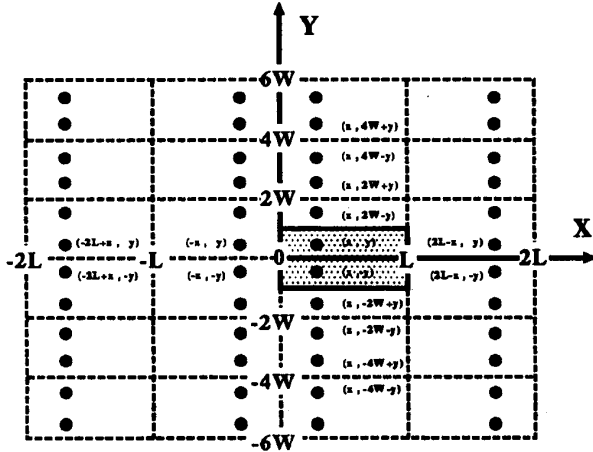


Fig. 2 Method of making a rectangular plate having thermally insulated edges

### 3. 強制対流熱伝達係数

ガラス板に空気吹き付けを行なった時の強制対流熱伝達係数を実験的に求めた。Fig. 3 は実験装置の概略である。最初、ガラス板をオープンで約1時間、200℃に保持した。そして、0.5[MPa]の圧縮空気を吹き付け、ガラス表面温度の時間的変化を測定した。実

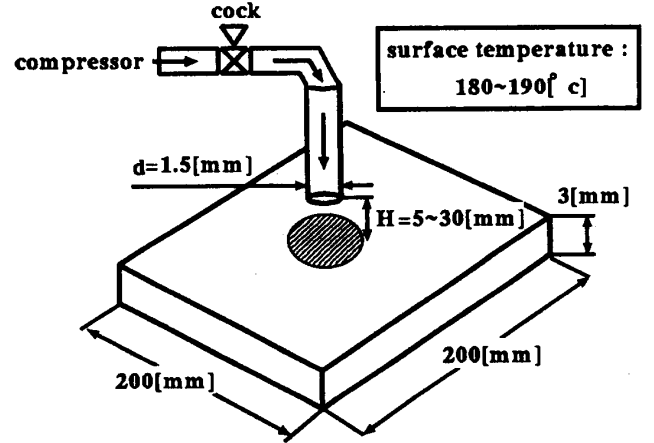


Fig. 3 Experimental setup

結果を Fig. 4 に示す。図中縦軸の  $h(r)$  はビオ数をノズル直径で除した値である。 $h(r)$  は吹き付け中心から離れるにつれ減少し、吹き付け流量が増すにつれ、より遠くまで影響していた。

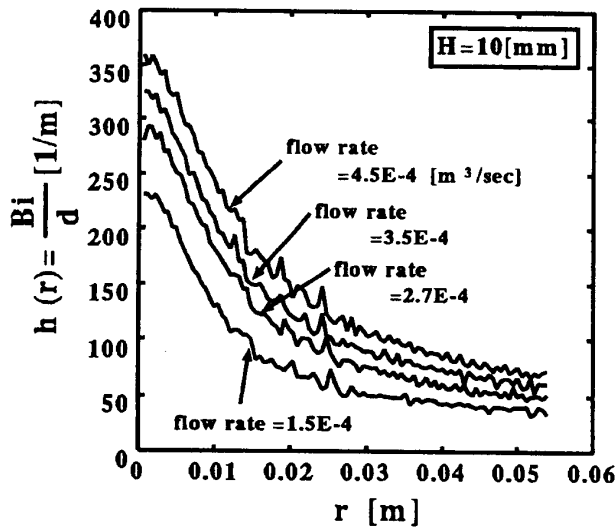


Fig. 4 Experimentally measured convection heat transfer coefficient

#### 4. 点熱源による熱応力拡大係数

Fig. 5 はき裂延長線上の上下対称な負の熱源対の位置によってき裂先端に生じる熱応力拡大係数の等強度線を示している。試験片サイズは  $W = 500[\text{mm}]$ ,  $L = 2000[\text{mm}]$ ,  $B = 1.8[\text{mm}]$ ,  $c = 600[\text{mm}]$  である。無次元加熱時間  $\kappa t/W^2$  は  $1.E-5$  である。これらの結果を影響係数として冷却効果を評価した。負の熱源対がき裂後方に作用すると、熱応力拡大係数は正となった。特に、き裂先端に近ければ近いほど、値は大きくなった。

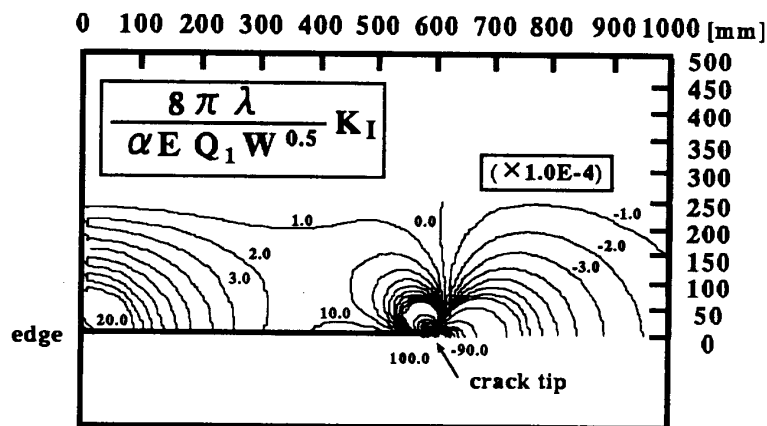


Fig. 5 The trajectory of heating location which gives the same thermal stress intensity factor

#### 5. 吹き付けによって奪われたエネルギー

Fig. 6 はき裂先端から後方  $5[\text{mm}]$  に吹き付け中心がある時に、奪われるエネルギーの分布を示している。

$\kappa t/W^2 = 1.0E-4$  に吹き付けを開始し、 $\kappa t/W^2 = 1.1E-4$  後の場合である。奪われるエネルギーは線熱源及び吹き付け中心から離れると、急激に減少した。

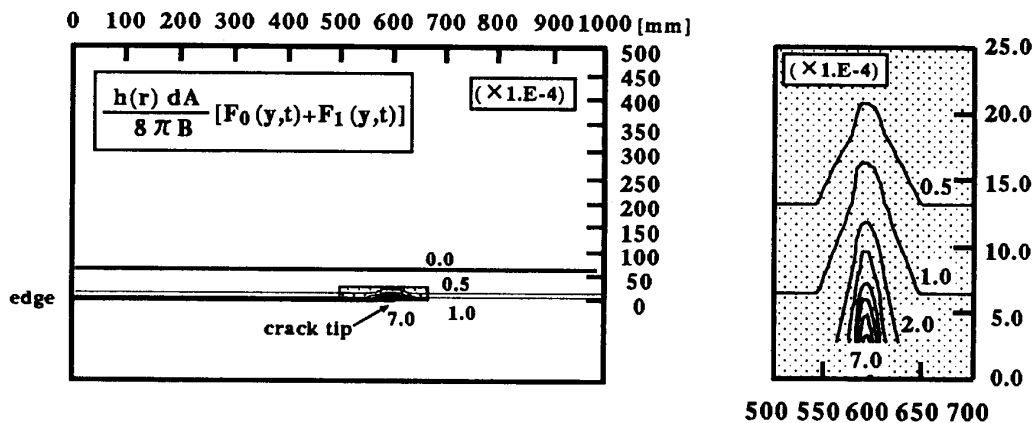


Fig. 6 The distribution of carried-away energy by airflow

## 6. 冷却効果

Fig. 7 吹き付け位置による熱応力拡大係数の時間的変化を示している。  $\kappa t/W^2 = 1.0E-4$  に吹き付けを開始し、  $\kappa t/W^2 = 1.1E-4$  後、熱応力拡大係数は  $a = 595[\text{mm}]$  で最大となった。もし吹き付け中心がき裂前方にあるならば、冷却は熱応力拡大係数を抑圧する。

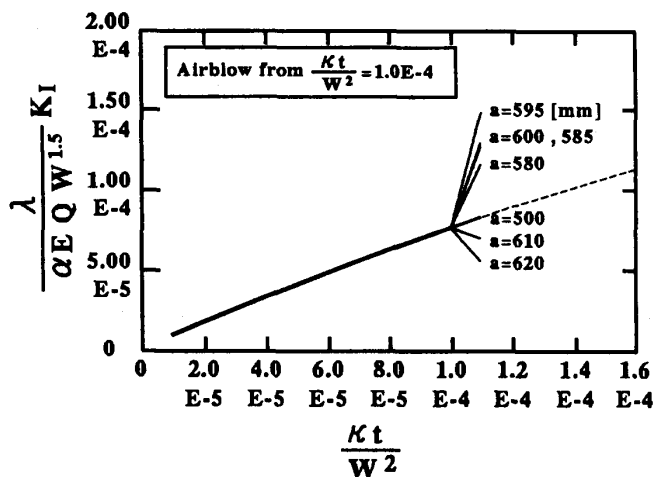


Fig. 7 Effect of airblow position

Fig. 8 は吹き付け開始時間の効果を示している。吹き付け開始時間に関わらず、最大の熱応力拡大係数は  $a = 595[\text{mm}]$  で得られた。より大きな熱応力拡大係数は十分発達した温度場の元で、吹き付けを開始すると良いと考える。

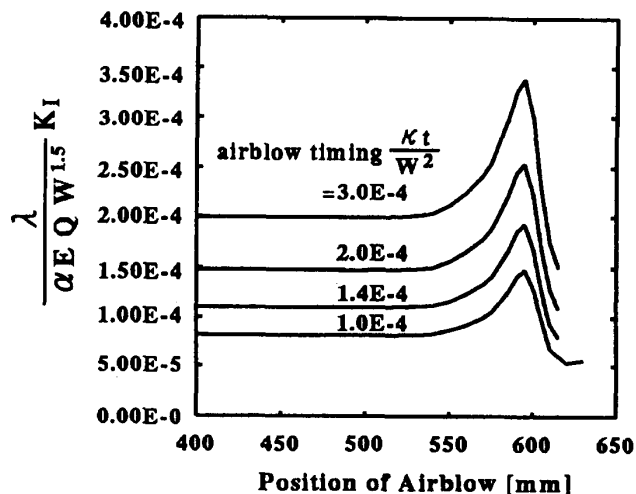


Fig. 8 Effect of airblow timing

## 7. 結言

比較的大きな試験片をモデルに吹き付けによる冷却の効果について、次のことが確かめられた。

1. 適切な吹き付け位置はき裂後方 5 ~ 10[mm]と き裂先端に近いところにある。
2. 吹き付け無しの場合と比較すると、吹き付けを開始して、  $\kappa t/W^2 = 1.0E-5$  後に熱応力拡大係数は 90%程の増加を示した。
3. 十分発達した温度場で吹き付けを開始すれば、熱応力割断にプラスの影響となると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 沢田, 今井, 才本, 線熱源による帯板の熱応力割断, 精密工学会誌, 64-2(1998), 302.
- 2) 才本, 沢田, 今井, ぜい性薄板の熱線割断と寸法効果, 材料, 47-8(1998), 813.
- 3) 本村, 今井, 才本, 長崎大学工学部研究報告, 27, 49, (1997), 179.